

3. RESISTENCIA EN FLUIDOS









3.1 Introducción

Cuando un **cuerpo sólido se mueve en el seno de un fluido**, se originan una serie de fuerzas sobre dicho cuerpo. El origen de esas **fuerzas** se debe a la **viscosidad** del fluido y a la resultante de las fuerzas debidas a las **presiones normales** a la superficie exterior del cuerpo sólido.

Por el **principio de acción y reacción**, el cuerpo ejerce sobre el fluido una fuerza igual y de sentido contrario a la que el fluido ejerce sobre el sólido. Es decir, el fenómeno de resistencia que un sólido experimenta al moverse en un fluido es, fundamentalmente, igual al de la resistencia que un fluido experimental al moverse en el interior de un sólido (como una tubería)

Fenómenos de la ingeniería sometidos a las mismas leyes:

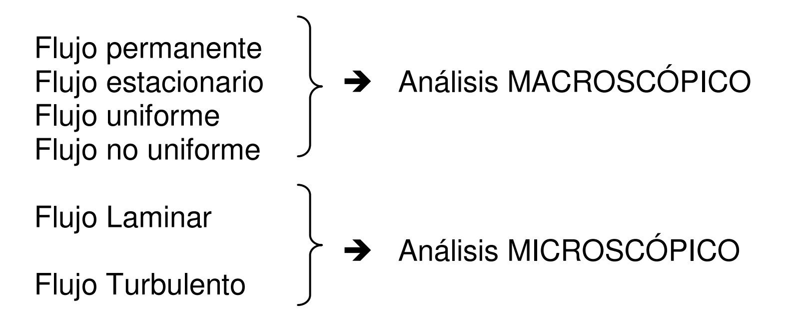
a) Pérdidas de energía o pérdidas de carga en conducciones cerradas
b) Flujo en conducciones abiertas o canales
c) Arrastre de un avión o vehículo terrestre
d) Navegación submarina

“a” y “b” ➔ Ingeniería hidráulica, “c” ➔ aeronáutica, “d” ➔ Ingeniería naval





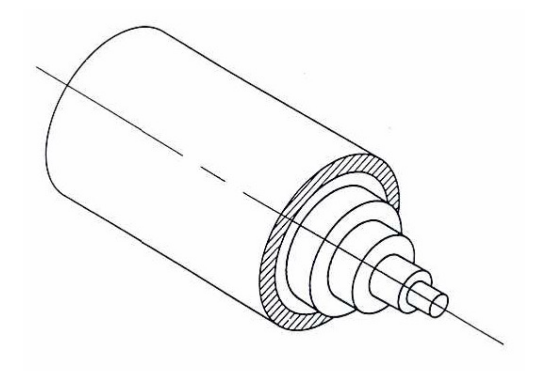
3.2 Flujo Laminar y Flujo Turbulento



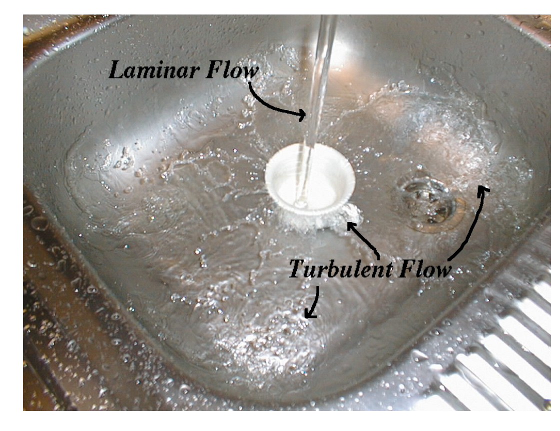
Flujo permanente
Flujo estacionario
Flujo uniforme
Flujo no uniforme
} ➔ Análisis MACROSCÓPICO

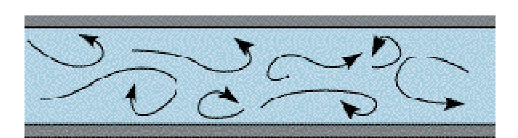
Flujo Laminar
Flujo Turbulento
} ➔ Análisis MICROSCÓPICO

Régimen **Laminar o de Poiseuille**: el flujo tiene un movimiento ordenado, en el que las partículas del fluido se mueven en líneas paralelas (en capas), sin que se produzca mezcla de materia entre las distintas capas.

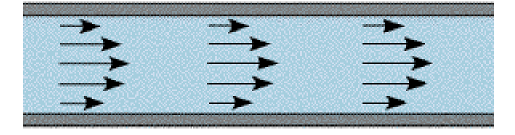


Régimen Turbulento o de Venturi: el flujo tiene un movimiento caótico, desordenado con mezcla intensiva entre las distintas capas.





En flujo laminar, prácticamente no existe mezcla del fluido entre las capas.



En flujo turbulento, existe mucha mezcla, debido a que la velocidad en cada punto no es constante. Dicha velocidad presenta una fluctuación en el tiempo, produciendo una alta disipación de energía.

Experimento para determinar el tipo de régimen; tubería cilíndrica de sección constante por la que circula un fluido a cierta velocidad, se inyecta tinta en un punto central de la tubería:

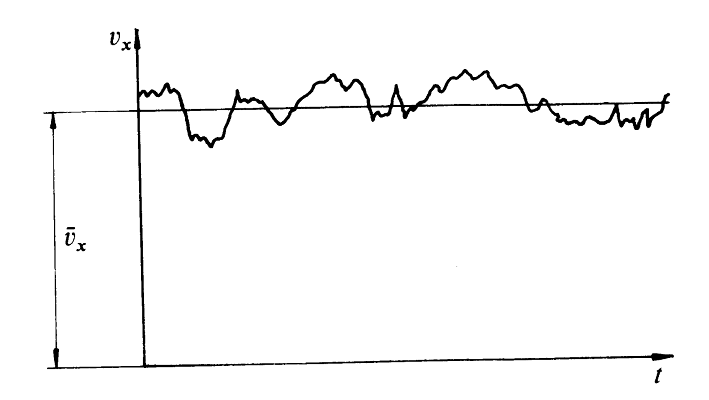
- Si el régimen es **laminar**, la tinta avanza con el agua como un fino hilo, mezclándose lentamente con esta por fenómenos de transporte por difusión. La mezcla entre el agua y la tinta es muy lenta. Esta situación se presenta para diámetros pequeños y velocidades bajas del fluido.
- A medida que aumenta la velocidad del flujo, llega un momento en que el régimen de movimiento se vuelve **turbulento**. Cuando el régimen es turbulento, la tinta se mezcla de forma inmediata con el agua, diluyéndose en ésta.

Dependiendo del tipo de flujo, laminar o turbulento, las fuerzas de rozamiento que aparecen serán de distintos tipos. En el caso de régimen laminar, las fuerzas que se ejercen entre las distintas capas del fluido son tangentes a la dirección del movimiento. Por el contrario, cuando se está en régimen turbulento aparece una segunda contribución a la fuerza de rozamiento debida a la mezcla entre las distintas capas.



El esfuerzo cortante que existe en un flujo turbulento se expresa:

$$\bar{\tau} = \eta_r \cdot \frac{d\bar{v}}{dy}$$



η_r ➔ Viscosidad de remolino

$\bar{v}$ ➔ Velocidad media en el tiempo



3.3 Número de Reynolds

El comportamiento de un fluido depende del régimen del flujo, laminar o turbulento.

Número de Reynolds (Re) ➔ Herramienta para determinar y predecir el tipo de flujo

Parámetro adimensional que depende de la densidad y viscosidad del fluido analizado, la velocidad del mismo y una dimensión característica que depende del sistema a analizar:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} = \frac{V \cdot L}{\nu}$$

Representa el cociente entre las fuerzas de inercia del flujo y las fuerzas debidas a la viscosidad, y mide la influencia relativa de esta última.

Si Re ↑↑ ➔ Flujo tiende a ser **turbulento** (debido a altas velocidades o bajas viscosidades)

Si Re ↓↓ ➔ Flujo tiende a ser **laminar** (debido a altas viscosidades o bajas densidades)

La expresión del número de Reynolds adopta diferentes formas para conductos circulares o no circulares, canales abiertos o flujo alrededor de cuerpos inmersos.

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \qquad \mathrm{Re} = \frac{\rho \cdot V \cdot 4R_h}{\mu} \qquad \mathrm{Re} = \frac{\rho \cdot V_\infty \cdot x}{\mu}$$

Números críticos de Reynolds

Para flujo en conductos, el número de Reynolds adopta la primera de las expresiones anteriores.

Normalmente se trabaja con los siguientes rangos:

- Si Re ≤ 2000 ➔ Flujo LAMINAR
- Si Re ≥ 4000 ➔ Flujo TURBULENTO
- Si 2000 < Re < 4000 ➔ Región CRÍTICA (no es posible predecir el régimen del flujo).

Número crítico inferior de Reynolds: Valor del Reynolds por debajo del cual el régimen es necesariamente laminar. Cualquier perturbación es amortiguada por la viscosidad

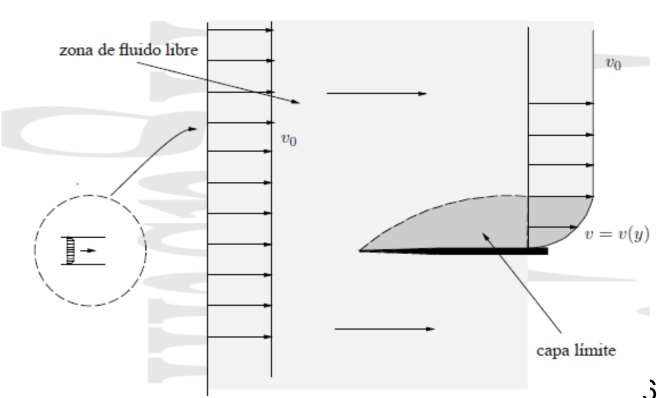


Se denomina **velocidad característica** a la velocidad por debajo de la cual toda turbulencia es amortiguada por la acción de la viscosidad del flujo.

En condiciones muy controladas, se han llegado a conseguir flujos laminares para valores del número de Reynolds mayores de 40000 (Re ≥ 40.000), sin embargo, para valores superiores a 4000 (Re ≥ 4000) cualquier pequeña perturbación provocaría un cambio de régimen laminar a turbulento, sin que el efecto de la viscosidad pudiera amortiguar la turbulencia. Por ello, este valor se suele considerar como en **Límite superior del Número de Reynolds**.

Para fluidos de pequeña viscosidad, o en genera, para valores grandes del número de Reynolds, el movimiento del fluido suele estudiarse por separado en dos zonas

- Zona de espesor pequeño (**capa límite**): en la que el efecto de las fuerzas viscosas es tan importante como el de las otras fuerzas.
- Zona de **fluido libre**: donde la influencia de la viscosidad es despreciable.





Ejemplo 1: Determinar el tipo de régimen existente en un conducto de sección circular de diámetro 1 pulgada, por el cual fluyen 285 L/min de agua a 70ºC.

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} = \frac{V \cdot L}{\nu}$$

D=1 pul = 0.02524m ➔ A= 5.017X10-4 m2

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{285\,L/\min}{5.017\times10^{-4}\,m^2}\times\frac{1\min}{60seg}\times\frac{1m^3}{1000\,L}$$

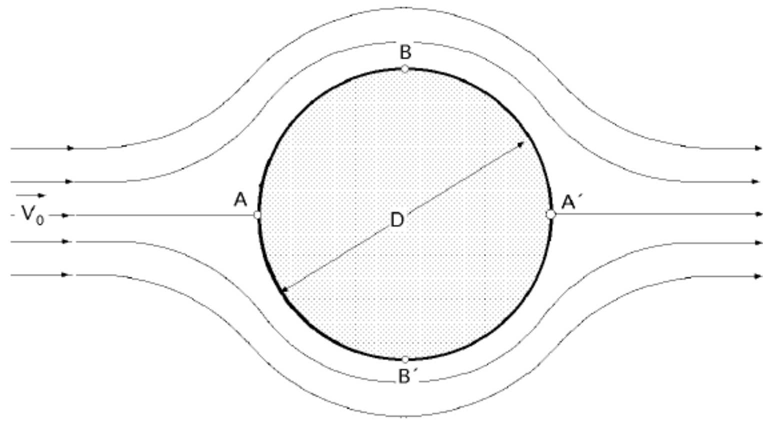
$$\nu = 4.11\times10^{-7}\,m^2/s$$

$$\mathrm{Re} = \frac{9.47\cdot 0.02527}{4.11\times10^{-7}} = 5.82\times10^5$$

3.4 Paradoja de D'Alembert

Si se analiza el movimiento de un cilindro circular en el interior de un fluido con una velocidad V_∞ de derecha a izquierda, esto es, dinámicamente hablando, equivalente al caso en que el cilindro está parado y existe una corriente que incide sobre él de izquierda a derecha con una velocidad V_∞.

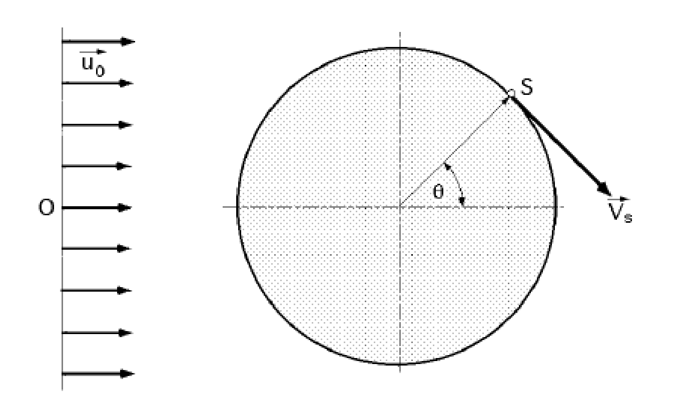
Si se supone un flujo ideal (μ=0 y energía constante en todos los puntos), se obtendrá una circulación del flujo como la que se muestra en la imagen:







Según la teoría de las líneas de corriente, se podría calcular la velocidad en el punto S de la superficie del cilindro como:



$$\vec{V}_S = 2 \cdot \vec{V}_0 \cdot sen\theta$$

Donde:

- Vs: Velocidad del fluido en un punto de la superficie
- V_0: Velocidad de la corriente no perturbada
- θ: ángulo que fija la posición del punto en el cilindro

Aplicando la ecuación de Bernoulli en un punto entre la entrada y el punto S:

$$P_0 + \frac{\rho \cdot V_0^2}{2} = P_S + \frac{\rho \cdot V_S^2}{2}$$

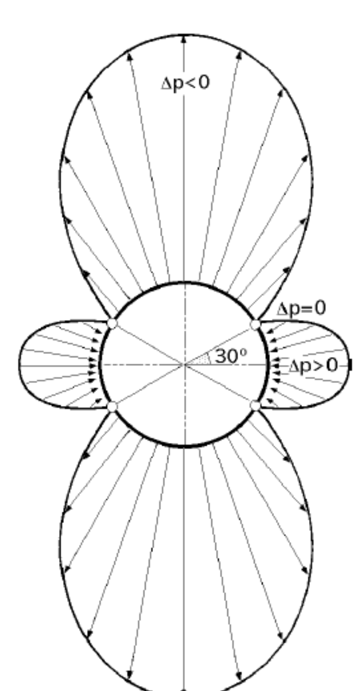


$$P_S = P_0 + \frac{\rho}{2}\left(V_0^2 - V_S^2\right) = P_0 + \frac{\rho}{2} \cdot V_0^2 \cdot \left(1 - 4 \cdot sen^2\theta\right)$$

Y por tanto:

$$\frac{P_0 - P_S}{\rho \cdot V_0^2 / 2} = \frac{\Delta P}{\rho \cdot V_0^2 / 2} = \left(1 - 4 \cdot sen^2\theta\right)$$

Las fuerzas debidas a la presión son normales a la superficie exterior del cilindro. Si se representa la resultante de dichas presiones sobre el cilindro se obtiene la siguiente distribución:



- La resultante de todas las fuerzas que actúan sobre el cilindro en la dirección normal al movimiento (sustentación) es nula.
- La resultante de todas las fuerzas que actúan sobre el cilindro en la dirección del movimiento (arrastre) es nula.
- El cilindro se movería en el interior de un fluido ideal sin experimentar resistencia alguna.

Sin embargo, se presenta el hecho paradójico de que el agua y el aire, a pesar de ser muy poco viscosos, ofrecen a un cilindro en movimiento una gran resistencia al avance ➔ Este hecho se conoce como **Paradoja de D'ALEMBERT**.

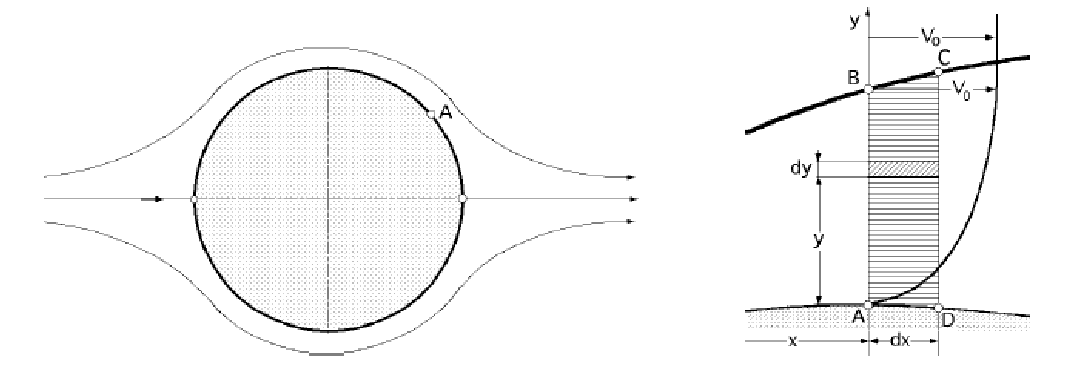
La explicación de esta paradoja llevó a la definición de dos conceptos primordiales en la mecánica de fluidos:

- La existencia de la Capa Límite
- El Desprendimiento de Capa Límite

La explicación de la Paradoja de DÀlembert se resume en los siguientes puntos. En cualquier fluido, por muy poco viscoso que sea:



a) Aunque microscópicamente las líneas de flujo se puedan parecer a las de un flujo ideal, microscópicamente en las inmediaciones del cilindro, el fluido se adhiere al mismo por efecto de su viscosidad, debido a lo cual, la velocidad del flujo en la superficie del cilindro se reduce a un valor nulo. Esta velocidad aumenta muy rápidamente en una zona muy estrecha, conocida como Capa Límite, hasta pasar de V=0 m/s a $V=V_S$.



Por tanto, según la ecuación de Newton, se produce sobre la superficie del fluido un esfuerzo cortante:

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dy}$$

Aunque la viscosidad es pequeña, la variación de velocidad es muy elevada en un espacio muy reducido, y por lo tanto el esfuerzo cortante es muy elevado. Esta resistencia se conoce como **Resistencia de Superficie.**

Por otra parte, la configuración de velocidades nunca va a ser como en un flujo ideal, a no ser que V0 sea muy pequeña, debido a que:

b) El cilindro, aerodinámicamente hablando, tiene una forma muy roma, y las líneas de corriente tienden a separarse de la superficie (Desprendimiento de Capa Límite), creando en la parte posterior remolinos que dan lugar a depresiones. Esto genera una resistencia al avance, conocida como **Resistencia de Forma**.

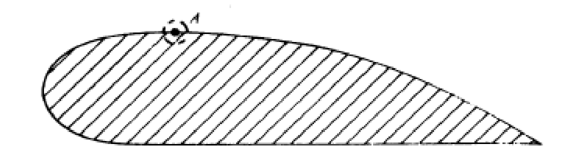
3.5 Teoría de Capa Límite: Resistencia de Superficie

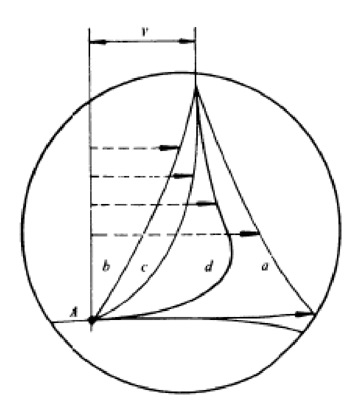
La **teoría de capa límite** ideada al comienzo del pasado siglo por Prandtl revolucionó la aeronáutica y toda la Mecánica de Fluidos, hasta el punto de que se considera a Prandtl como el fundador de la Mecánica de Fluidos moderna.

Esta teoría tiene una especial aplicación en fluidos poco viscosos, como el aire y el agua, y por tanto es una teoría fundamental en la aeronáutica y en la ingeniería naval.

En un cuerpo sólido sumergido en una corriente fluida, por ejemplo, el ala de un avión en una corriente de aire, se puede estudiar la distribución de velocidades a lo largo de una normal a la superficie en un punto. Si se utiliza un instrumento de medida de velocidad cerca de ese punto, se obtendrá un valor de velocidad a nivel “macroscópico”. Sin embargo, se sabe que a causa de la viscosidad, la velocidad en cualquier punto de la superficie del sólido es 0.

Si se analizar de forma “microscópica” la velocidad, se puede obtener una de las siguientes distribuciones de velocidad en un espesor muy pequeño (**capa límite**).





- Si el fluido fuera ideal, la teoría de la hidrodinámica proporcionaría una distribución de velocidades como la de la curva *"a".*
- Si los efectos de la viscosidad son muy apreciables (número de Reynolds bajo), la distribución de velocidades es parabólica y se representa por la curva *"b".*
- Si los efectos de la viscosidad son muy poco apreciables (números de Reynolds altos), la distribución de la velocidad es logarítmica y se representa por la curva *"d".*
- Para un régimen intermedio (Reynolds en zona crítica), el perfil de velocidades sería un caso intermedio entre las curvas *"b"* y *"d"* (Curva *"c"*)
- La curva *"d"* sólo se diferencia de la curva *"a"* en una zona muy pequeña en la normal al contorno en un punto cualquiera. Esa zona se denomina ***capa límite***.

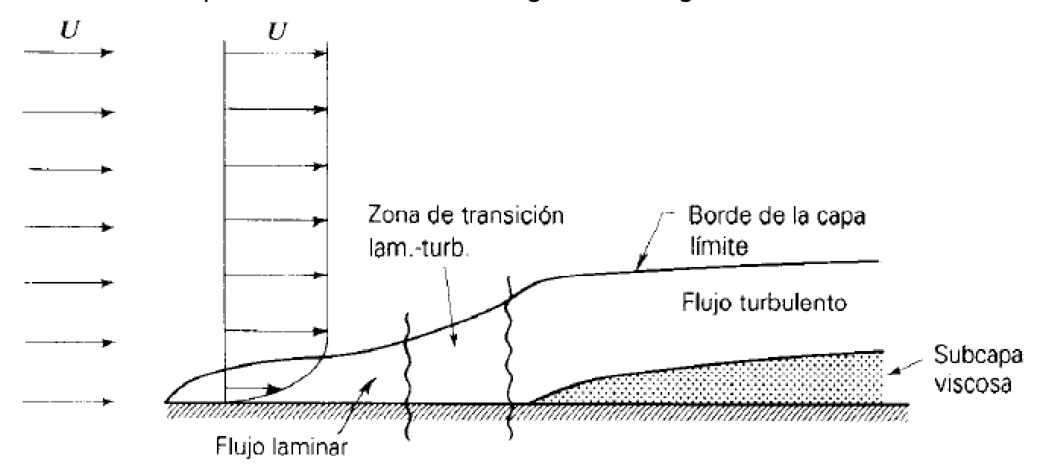
Esa zona de capa límite:

- Tiene un espesor muy pequeño, del orden de micras o milímetros según los casos.
- En ella tienen gran importancia los efectos de la viscosidad y el rozamiento, a pesar de que la viscosidad sea baja, ya que los gradientes de velocidad son muy elevados.
- Fuera de esa zona un fluido poco viscoso (como el agua o aire) se comporta como un fluido ideal.
- Fuera de la capa límite, se pueden aplicar todos los métodos matemáticas (ecuaciones de Euler o de Navier-Stokes) para caracterizar el campo de velocidades y presiones en las inmediaciones de las paredes sólidas.



3.6 Capa Límite Laminar y Turbulenta

Si se analiza el comportamiento de la capa límite sobre una placa plana sumergida en una corriente fluida con una velocidad constante y paralela a la placa, se puede representar el comportamiento de la capa límite como el de la siguiente imagen.





El fluido en contacto con la placa queda fijo por efecto de la adherencia y las siguientes “capas” sufren un frenado por efecto de la viscosidad.
El espesor de la capa límite suele definirse como la distancia desde la superficie hasta el punto en que su velocidad difiere de la velocidad correspondiente al fluido ideal en un 1 por 100.

Inicialmente la capa limite es laminar al comienzo del borde de ataque y aumenta su espesor progresivamente. Luego se alcanza una región de transición laminar-turbulento donde el flujo cambia de régimen, con un engrosamiento consiguiente de la capa límite.

La experiencia a permitido determinar que, para placa plana el movimiento laminar en la capa límite llega a hacerse inestable cuando se sobrepasa un valor crítico del número de Reynolds:

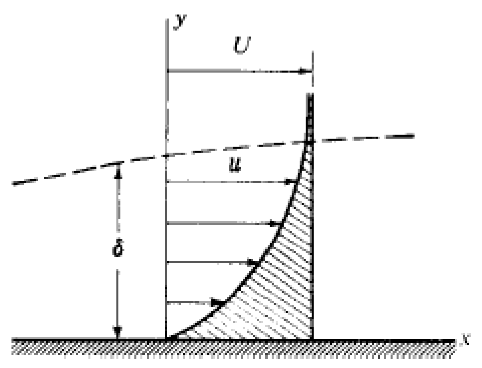
$$5 \cdot 10^5 < \mathrm{Re} = \frac{\rho \cdot V_\infty \cdot x}{\mu} > 3 \cdot 10^6$$

La capa límite continúa su desarrollo a partir de la zona de transición, y se origina la capa límite turbulenta, que se divide en dos subcapas, una de las cuales, en las proximidades de la plaza, permite definir una delgada subcapa marcadamente laminar, denominada **subcapa laminar o viscosa**, en la cual los efectos de la viscosidad predominan sobre los efectos turbulentos.

En el estudio de la capa límite hay que tener en cuenta varias consideraciones:



a) Aunque la perturbación producida por la fricción se propaga a todo el fluido, se admite que la propagación queda limitada a una zona de espesor finito, δ , en sentido normal al contorno.



$$\frac{\delta}{x} = 4.96 \cdot \left(\mathrm{Re}_X\right)^{-1/2}$$

Ecuación de Blasius

b) La forma de la curva de distribución de velocidades en las distintas secciones a lo largo de la capa límite se puede expresar, en general, mediante las siguientes ecuaciones:

Régimen laminar ➔ $$\frac{u}{V_0} = C + C_1\left(\frac{y}{\delta}\right) + C_2\left(\frac{y}{\delta}\right)^2 + C_3\left(\frac{y}{\delta}\right)^3 + \ldots$$

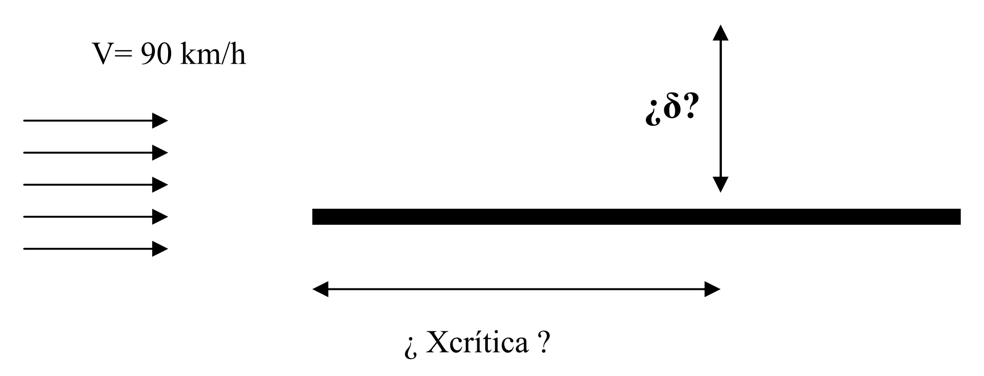
Régimen turbulento ➔ $$\frac{u}{V_0} = \sqrt[m]{\frac{y}{\delta}}$$



Para fluidos que circulan entre dos paredes próximas, el ensanchamiento progresivo de la capa límite de cada contorno determina que éstas se unan, a una cierta distancia de la entrada, despareciendo la zona en que el movimiento podía ser asimilable al de un fluido ideal, para realizarse todo él bien en régimen laminar, o bien en régimen turbulento, según el valor del número de Reynolds.



Ejemplo 2: Una placa plana se encuentra sumergida en una corriente fluida de aire a temperatura ambiente, la cual fluye a una velocidad de 90 Km/h.
Determinar la distancia, a partir del borde de ataque de la placa, a partir de la cual la capa límite se hará totalmente turbulenta.
Determinar el espesor de la capa límite cuando el Reynolds alcanza el valor de $3x10^5$



3.7 Desprendimiento de Capa Límite: Resistencia de Forma

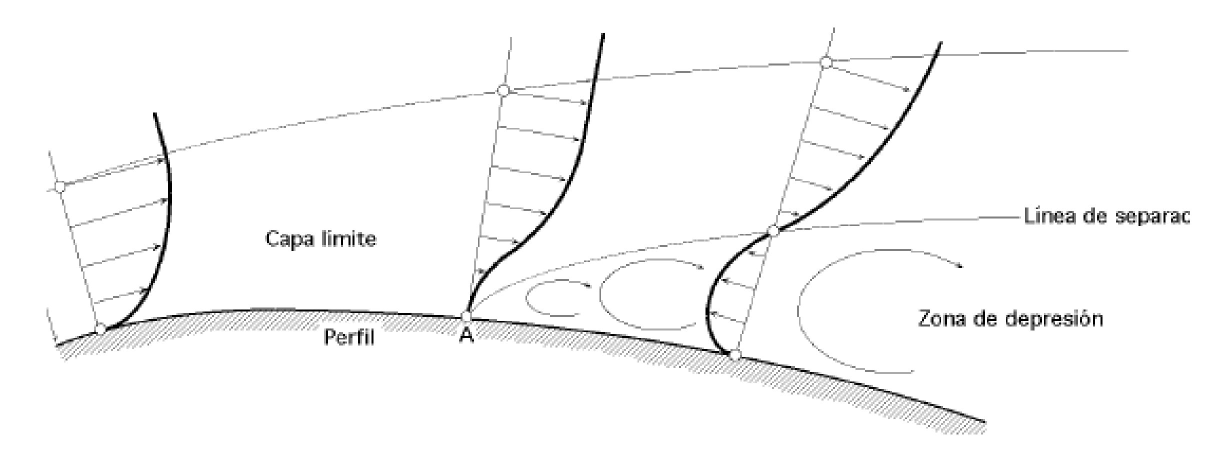
El **desprendimiento de capa límite** conduce al concepto de resistencia de forma.

En una placa plana, se ha visto que el espesor de la capa límite aumenta con la distancia a partir del borde de ataque, lo que se explica por la deceleración que sufre el fluido a causa del esfuerzo cortante (viscosidad). Este efecto se produce cuando el gradiente de presiones se mantiene nulo a lo largo de la placa plana.

Si se tiene un conducto o sección convergente, la aceleración del flujo compensa la deceleración que sufre por el esfuerzo cortante, y se opone al aumento de espesor de la capa límite.

Sin embargo, si el conducto o sección es divergente, la presión aumenta en la dirección de la corriente, produciéndose un gradiente de presiones adverso, que se opone al movimiento y tiende a retardar el flujo, lo cuál se suma al efecto decelerador producido por el esfuerzo cortante. Esto produce que la capa límite se pueda separar el contorno, produciéndose el conocido efecto de **desprendimiento de capa límite**.





El flujo en las proximidades del contorno se va continuamente decelerando a causa de la velocidad, hasta que en el punto A, la velocidad es cero. La forma del contorno exigiría aún una disminución mayor de la velocidad, porque allí el contorno diverge; pero como esto es imposible, el flujo se separa del contorno al mismo tiempo que se produce un contraflujo producido por el gradiente de presiones adverso. En esa zona de desprendimiento se produce una zona de baja presión.



Aguas arriba la presión será más alta que aguas abajo. El cuerpo sumergido en el flujo experimentará una fuerza debida a este gradiente de presiones.

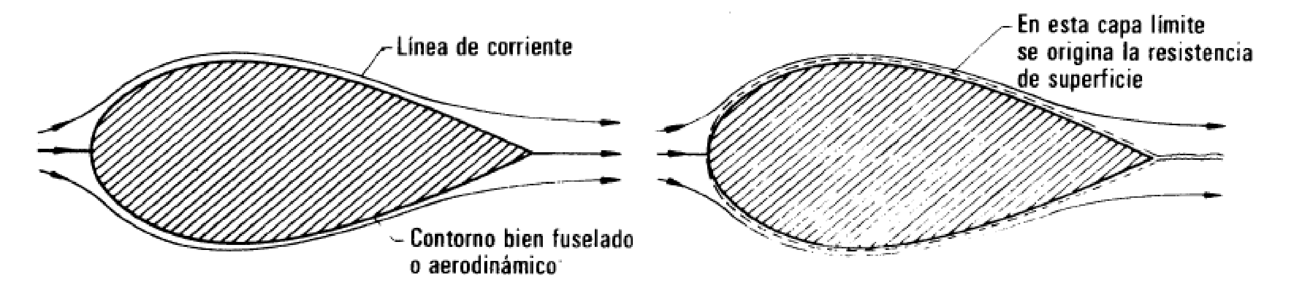
Si el sólido se mueve, la fuerza se opondrá al movimiento, será una resistencia, que se denomina resistencia de forma, por depender de la forma del cuerpo.

$$F_a = \frac{C_w \, \rho \, V_0^2 \, A_{Frontal}}{2}$$



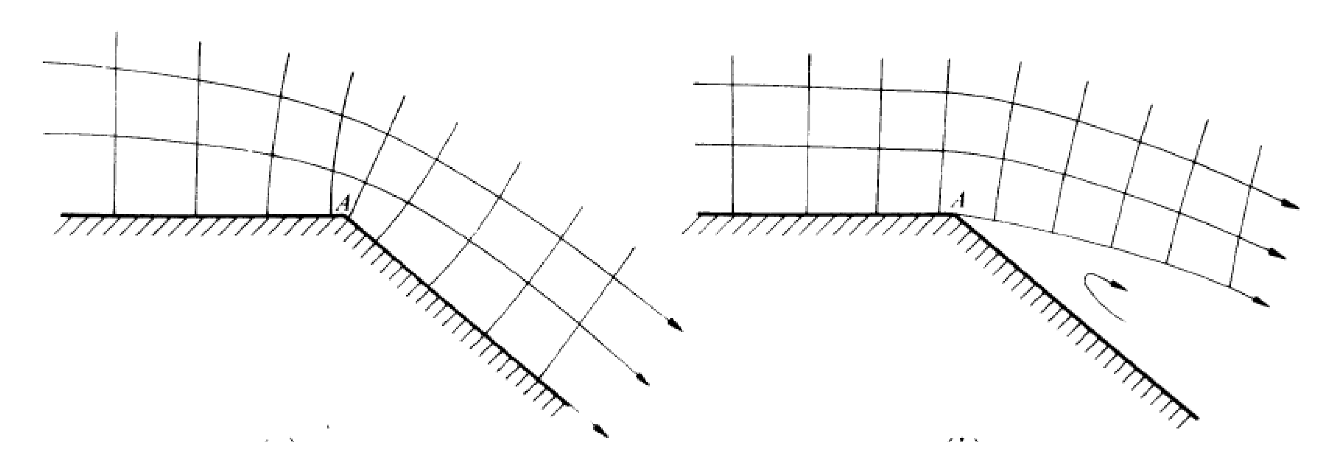
3.8 Resistencia de Forma: Cuerpos romos y Contornos bien fuselados

a) Un contorno bien fuselado evita en el fluido real el fenómeno de desprendimiento, y por tanto el fenómeno de resistencia de forma, limitándose la resistencia a la resistencia de superficie debida al efecto de la capa límite.



b) En un contorno angular, la velocidad en el punto A se tendría que hacer teóricamente infinita si el flujo permaneciese adherido al contorno, pero este efecto es físicamente imposible, por lo que se produce e desprendimiento de la corriente

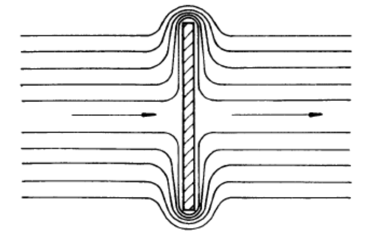


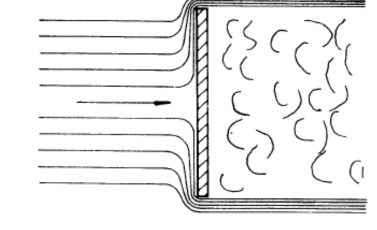


En el caso del fluido ideal, no existe ni capa límite ni efecto de desprendimiento de la misma. Sin embargo, en el caso del fluido real, en el punto A se inicia el desprendimiento, lo cual produce un efecto de depresión en la zona desprendida y origina una resistencia de forma que se une al efecto de la resistencia de superficie debida a la capa límite.

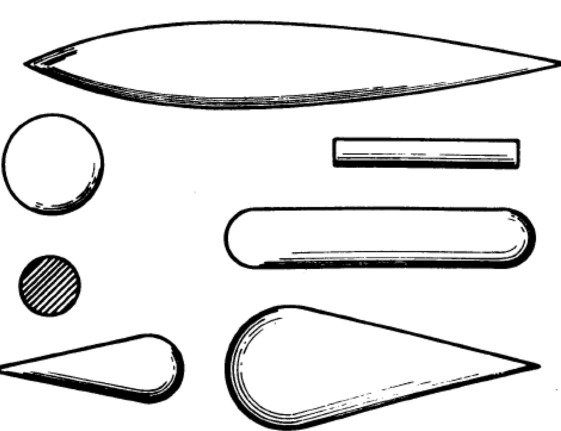


c) Placa plana colocada transversalmente a la corriente. Las líneas de corriente del fluido real aguas abajo no pueden seguir al contorno, por lo que la capa límite se desprende. Esto origina una resistencia de forma enorme.





d) Todos los cuerpos de la siguiente imagen tienen la misma resistencia a un flujo que va de izquierda a derecha.





BIBLIOGRAFÍA

- Fluid Mechanics. Frank M White. Editorial McGraw-Hill
- Mecánica de Fluidos Aplicada. Robert L Mott. Editorial PrenticeHall
- Mecánica de Fluidos. Irwing H. Shames. Editorial McGraw-Hill
- Mecánica de Fluidos. Antonio Crespo. Universidad Politécnica de Madrid.